

пульсному магнітному полю. Технічні вимоги та методи випробувань. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 20 с. 7. ГОСТ Р 51317.412-99 Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 28 с. 8. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

*Поступила в редколлегию 10.10.2007.*

УДК 621.319.4

**В.В.ПУДАКОВ**, докт. техн. наук;

**Ю.В.КРАВЧЕНКО; В.О.ЛЫСЕНКО**; НТУ «ХПИ»

### **«КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ» У СКОШЕННОГО КРАЯ ОБКЛАДКИ КОНДЕНСАТОРА**

Проведено розрахунок напруженості електричного поля на поверхні скошеного краю обкладки конденсатора з урахуванням діелектричного прошарку, що прилягає до краю обкладки в залежності від співвідношення геометричних розмірів і діелектричних проникностей елементів конструкції.

Calculation of electric field intensity on a surface of the capacitor facing oblique edge in view of the dielectric layer adjoining to a facing edge depending on a parity of the geometrical sizes and capacitivities of design elements is made.

**Актуальность.** Одним из методов повышения удельных характеристик импульсных высоковольтных конденсаторов является применение комбинированной изоляции [1,2]. В последнее время получены положительные результаты и при применении чисто пленочной изоляции, пропитанной изоляционным маслом [3]. Результаты по определению мест пробоя в том и другом случае показывают, что отказы происходят преимущественно на краях обкладок. Основной причиной отказов является резко выраженный «краевой эффект» [4]. Исследованию электрических полей на краях обкладок посвящено много работ [5-9], преимущественно для однородного диэлектрика. Известны работы [8, 9] по определению коэффициента усиления электрического поля у края обкладки с прямоугольной формой торца для комбинированной изоляции в присутствии масляной прослойки, примыкающей к торцу. В работе [10] показано существенное влияние геометрии расположения слоистой изоляции у края закругленного электрода на величину напряженности электрического поля и проведен выбор оптимальной конструкции. В то же время форма торца края обкладки как показали экспериментальные исследования [11]

имеет скошенную форму с углом скоса, изменяющимся вдоль периметра обкладки в диапазоне от  $30^0$  до  $90^0$ . В работе [11] приведены результаты распределения поля у скошенного торца в зависимости от угла скоса в однородном диэлектрике. Показано, что наилучшие удельные характеристики при угле скоса обкладки  $30\text{-}40^0$  достигается при отношении толщины фольги к толщине диэлектрика  $0,12\text{-}0,16$ . В то же время результаты по определению электрического поля у края скошенного электрода в присутствии комбинированного диэлектрика отсутствуют.

Поэтому, определение характера электрического поля у края скошенного электрода с учетом диэлектрических проницаемостей применяемых диэлектриков является актуальной задачей.

**Цель работы.** Определение характера распределения электрического поля у края скошенного торца обкладки конденсатора и разработка рекомендаций по выбору диэлектрических проницаемостей масляной прослойки, прилегающей к торцу обкладки, и твердого диэлектрика, толщин обкладки и изоляции, обеспечивающих лучшее распределение электрического поля.

**Постановка задачи.** Упрощенная модель края обкладки представлена на рис. 1, где электрод со скошенным торцом и толщиной  $h$ , находящийся под потенциалом  $U_0$  расположен между двумя бесконечными электродами с нулевым потенциалом. К торцу обкладки примыкает прослойка диэлектрика толщиной  $h$  с  $\varepsilon_1$ , а между обкладками, расстояние между которыми  $d$  (в данной задаче принималось, что  $d = 100$  мкм), расположена изоляция с  $\varepsilon_2$ . Характерный диапазон изменения геометрических размеров составил:  $h/d = 0,05 \div 0,5$ ;  $\alpha = 15 \div 90^\circ$ ;  $b_2 = b_3 = 3d$ ;  $b_1 = b_4 = 3d + h/\operatorname{tg} \alpha$ . Диапазон изменения относительных диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,1 \div 10$ .

Требуется определить напряженность электрического поля на сходящихся под углом  $\alpha$  торцевых поверхностях края обкладки на расстоянии  $r \leq 0,1 d$  от вершины угла скоса.

**Методика решения.** Для определения напряженности электрического поля в электростатическом приближении использованы следующие граничные условия:  $U = U_0$  – потенциал обкладки со скошенным торцом,  $U = 0$  – потенциал двух бесконечных электродов, между которыми находится обкладка; условие равенства нормальных составляющих вектора электростатической индукции на границе раздела  $i$ -го и  $k$ -го диэлектриков:

$$\varepsilon_i E_{iN} = \varepsilon_k E_{kN}, \quad (1)$$

где  $E_{iN}$  и  $E_{kN}$  соответственно нормальные составляющие вектора напряженности электрического поля, действующие соответственно в  $i$ -й и  $k$ -й диэлектрических средах.

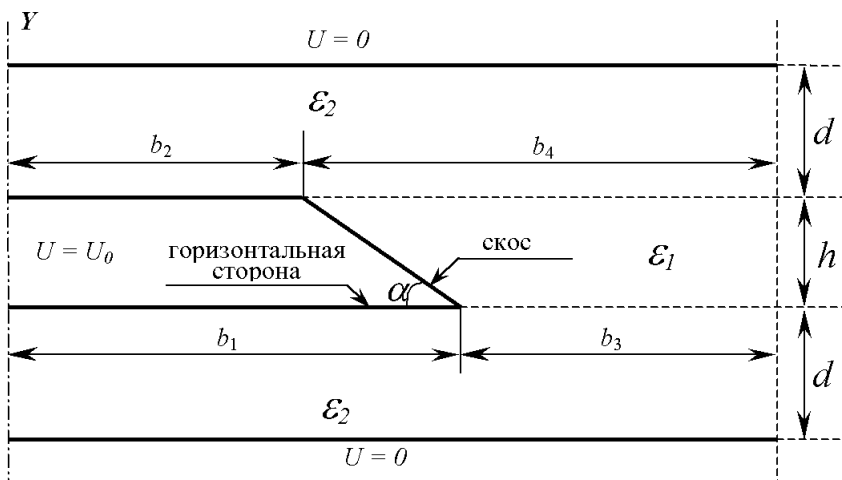


Рисунок 1 – Упрощенная модель края обкладки

Задача решена методом интегральных уравнений [8] с использованием уравнений Фредгольма первого рода (для потенциалов) и второго рода (для условия равенства нормальных составляющих вектора электростатической индукции на поверхностях раздела сред):

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \int_{S_{Qi}} \sigma \cdot \ln \frac{1}{r_{QM}} dS = U_0(M), \quad (2)$$

$$\frac{\sigma(M)}{2\epsilon_0} + \lambda \cdot \sum_{i=1}^m \int_{S_{Qi}} \sigma \cdot \frac{\cos(\vec{r}_{QM}, \vec{n})}{r} dS = 0, \quad (3)$$

где  $\lambda = \frac{\epsilon_k - \epsilon_i}{\epsilon_k + \epsilon_i}$ ,

$\sigma$  – поверхностная плотность электрических зарядов на  $i$ -х поверхностях электродов и границ раздела диэлектрических сред (всего характерных границ –  $m$ );

$r_{QM}$  – расстояние от точки  $Q$  расположения поверхностного заряда  $\sigma$  до точки наблюдения  $M$ ;

$\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности раздела сред, направленный из  $i$ -той среды в  $k$ -тую;

$S_{Qi}$  – поверхность  $i$ -той границы.

Система интегральных уравнений (2) и (3) была сведена к системе линейных интегральных уравнений в предположении, что каждая из характерных границ имеет бесконечную длину в направлении, перпендикулярном

плоскости рис. 1 рассматриваемой задачи, а в направлении, совпадающим с плоскостью рисунка, разбита на отрезки равной длины, причем на каждом из отрезков плотность заряда предполагалась постоянной. При этом коэффициенты матрицы системы линейных алгебраических уравнений в интегральной форме от ядер Фредгольма 1 и 2-го родов при неизвестных плотностях зарядов определялись численным интегрированием методом прямоугольников с заданной точностью.

Для реализации компьютерной программы использованы подпрограммы, приведенные в пособии [8]. Результаты расчета приведены в виде значений напряженности электрического поля на поверхности электродов и нормальной составляющей напряженности электрического поля на поверхности границ раздела диэлектрических сред.

Учет симметрии относительно вертикальной плоскости  $Y$  позволил сократить число неизвестных в 2 раза.

**Результаты расчетов.** Общее число узлов разбиения границ расчетной области составляло от 200 до 1200. Достаточная для расчетов точность вычислений (менее 5%) достигается уже при числе разбиения границ области не менее 400. Следует заметить, что на первых 2-3 отрезках области разбиения от вершин углов в ряде случаев наблюдается более высокое значение погрешности, которое обусловлено выбором кусочно-постоянной плотности зарядов в области резконеоднородного поля. Поэтому производилась коррекция плотности зарядов в этой области с помощью степенных функций и с учетом полученных результатов в дальней области.

На рис. 2,3 выборочно представлены зависимости  $E^* = E_r/E_0$  (где  $E_0 = U/d$ ) от расстояния  $r$  до вершины острого угла и от вершины смежного тупого угла при различных  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  для  $h/d = 0,2$  и остром угле скоса  $\alpha = 30^\circ$  (рис. 2 – на скосе (первое и третье значение напряженности  $E^*$  при  $r \leq 0,65$  на графиках не представлены), рис. 3 – на горизонтальной части).

Анализ этих зависимостей, а также всех результатов расчета позволяет сделать ряд выводов.

Напряженность электрического поля у острого угла скоса в большинстве случаев превышает напряженность электрического поля у тупого угла скоса (рис. 2). Однако, при  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 0,4$  (реально это соответствует появлению газовой прослойки у края обкладки) напряженность электрического поля у вершины тупого угла на расстоянии  $r \geq (1-2)$  мкм может превышать напряженность электрического поля у острого края обкладки. Учитывая, что характерный размер образующихся газовых пузырьков в результате действия критических частичных разрядов составляет единицы микрон, то возможны более интенсивные процессы разрушения именно у вершины тупого угла для конденсаторов с высокой удельной энергией. Это возможно и по той причине, что с увеличением размеров пузырьков газа их электрическая прочность

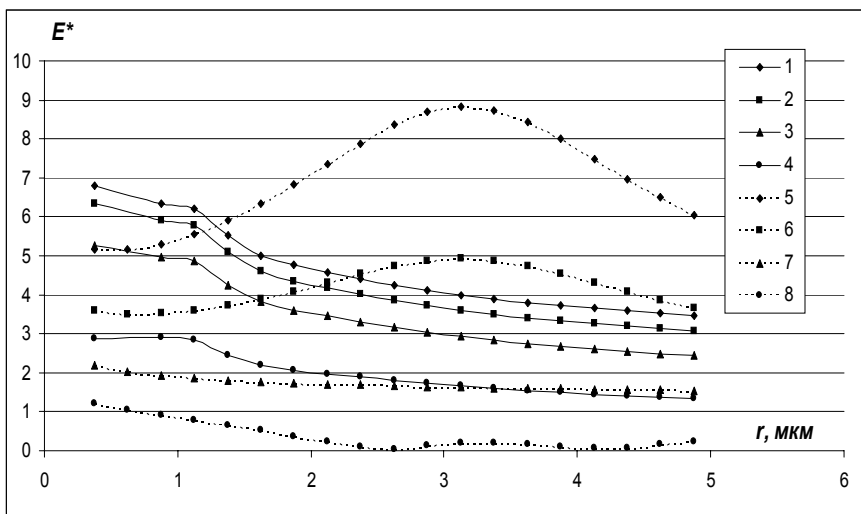


Рисунок 2 – Зависимости  $E^* = f(r)$  на скосе обкладки для различных соотношений  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  для острого,  $\alpha = 30^\circ$ , (кривые 1-4) и смежного с ним тупого угла (кривые 5-8): кривые 1,5 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,2$ ; кривые 2,6 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,4$ ; кривые 3,7 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1$ ; кривые 4,8 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 5$ .

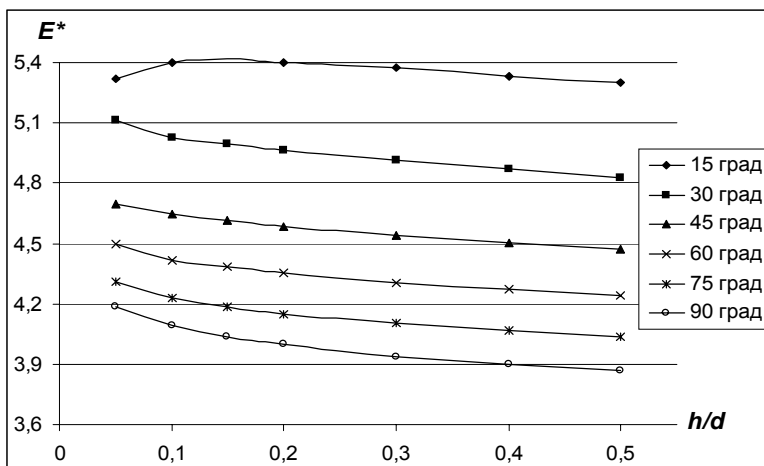
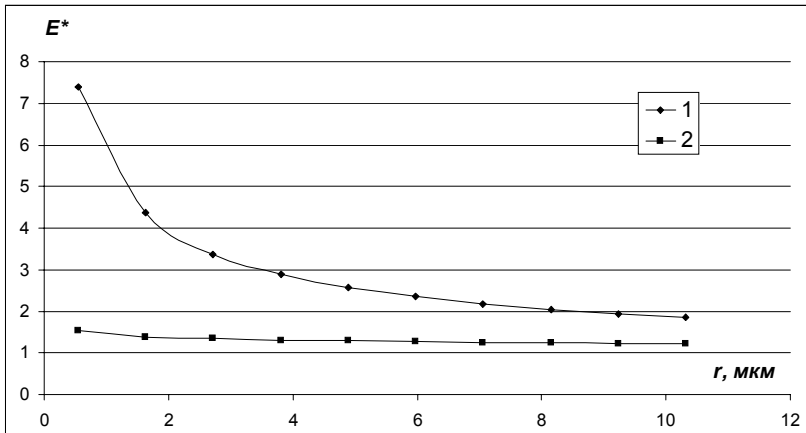


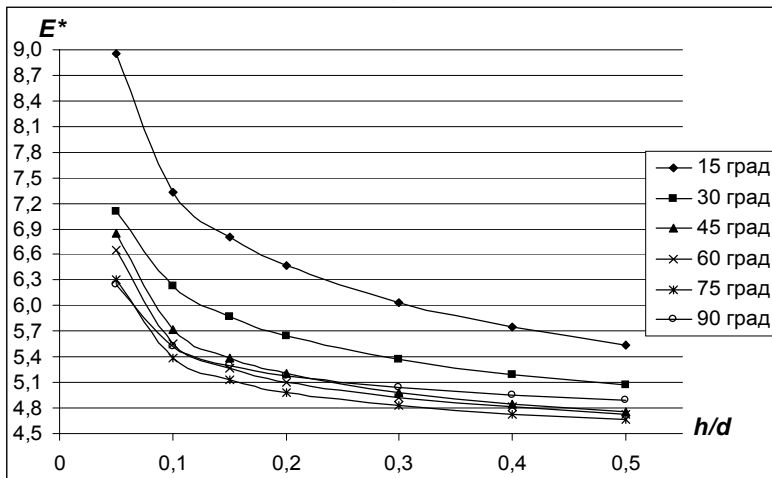
Рисунок 3 – Зависимости  $E^* = f(r)$  на горизонтальной стороне обкладки при  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,2$  для острого,  $\alpha = 30^\circ$ , (крив. 1) и смежного с ним тупого угла (крив. 2)

уменьшается. Согласно теории «напряженного объема» [12] при разрушении изоляции вблизи поверхности электродов с кромками, образующих тупые углы, показатель степени в формуле «жизни» (зависимости ресурса от на-

пряженности электрического поля) принимает большие значения (10-16), что соответствует экспериментальным данным разрушения конденсаторной изоляции при напряженностях электрического поля, значительно превышающих рабочие. В отличие от скошенной грани напряженность поля на горизонтальной части обкладки вблизи острого угла всегда больше напряженности электрического поля на горизонтальной части у тупого угла (рис. 3). С увеличением отношения  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  напряженность электрического поля в равноудаленных от вершин углов точках монотонно уменьшается.



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимость  $E^* = f(h/d)$  для различных углов скоса:

а) на горизонтальной стороне обкладки; б) на скосе обкладки

Увеличение толщины обкладки (рис. 4) приводит к ослаблению электрического поля на горизонтальной части и на скосе обкладки у вершин углов края обкладки. При этом, чем больше угол скоса, тем меньше напряженность электрического поля, за исключением случая, когда  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,2$  (рис. 4, б). В этом случае напряженность электрического поля на скосе при угле  $90^\circ$  может превышать напряженность электрического поля при угле  $45^\circ$ .

Полученные результаты при соответствующей доработке могут быть использованы для расчета оптимального отношения толщины обкладки к толщине диэлектрика при различных соотношениях диэлектрических проницаемостей для достижения максимальной удельной энергии с учетом объема, занимаемого обкладками. Представляет интерес и расчет электрического поля в подобной конструкции с различными диэлектрическими слоями между обкладками.

### **Выводы.**

1. Численным методом вторичных источников определена напряженность электрического поля на поверхности скошенного края обкладки конденсатора с учетом диэлектрической прослойки, прилегающей к краю обкладки в зависимости от соотношения геометрических размеров (толщины обкладки и толщины диэлектрика, угла скоса) и диэлектрических проницаемостей.

2. Увеличение толщины обкладки, угла скоса и диэлектрической проницаемости масляной прослойки в большинстве случаев приводят к улучшению распределения электрического поля у края обкладки.

3. Показано, что при наличии газовых включений, когда  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 0,2$ , возможно развитие более интенсивных ионизационных процессов у кромок обкладок с тупыми углами, где напряженность электрического поля больше.

4. При больших толщинах обкладки и  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 0,2$  напряженность электрического поля на скосе при угле  $90^\circ$  может превышать напряженность электрического поля при угле  $45^\circ$ .

5. Полученные результаты могут быть использованы при выборе структуры конденсаторного диэлектрика и оптимизации конструкции конденсатора.

**Список литературы:** 1. Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Гумерова Н.И., Иманов Г.М. и др. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. – 608 с. 2. Рудаков В.В. Выбор рабочей напряженности электрического поля масляных бумажно-полипропиленовых конденсаторов // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 37. – С. 76-80. 3. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Прогнозирование ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком в зависимости от режимов эксплуатации // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Межд.науч.школы. – Николаев: КП «Николаевская областная типография», 2005. – С. 125-126. 4. Рудаков В.В. Распределение электрического поля у края обкладки с комбинированным диэлектриком // Вестник ХГПУ. – 1998. –

Вып. 25. – С. 12-16. **5.** Кирьяков А.М., Попова В.А., Шнеерсон Г.А. Расчет напряженности поля вблизи кромки электрода в неоднородной среде // Изв. АН СССР Сер. Энергетика и транспорт. – 1978. – № 5. – С. 108-114. **6.** Титов М.Н. Исследование методом конформных отображений электрического поля конденсатора с неоднородным диэлектриком // Электричество. – 1982. – № 9. – С. 57-59. **7.** Колечицкий Е.С., Плис А.И., Шульгин В.К. Регулирование электрических полей в бумажно-масляной изоляции с конденсаторными обкладками. Ч. 2 // Электричество. – 1996. – № 3. – С. 23-28. **8.** Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. – К.: ИСЮ, 1995. – 120 с. **9.** Рудаков В.В., Конотоп В.В., Пенцов В.М. Краевой эффект в конструкции конденсаторного типа с неоднородным диэлектриком // Электропромышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1978. – Вып. 6. – С. 11-12. **10.** Рудаков В.В., Покладов О.В., Кравченко Ю.В. Расчет электрического поля системы плоских электродов с твердым диэлектриком // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 72-75. **11.** Рудаков В.В. Оптимизация конструкции конденсатора // Техническая электродинамика. – 1996. – № 5. – С. 6-9. **12.** Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О.Бржезицького та В.М.Михайлової. – Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. – 930 с.

*Поступила в редколлегию 27.11.2007*

УДК 622.24.537.528

**О.Н.СИЗОНЕНКО**, докт.техн.наук; **Э.И.ТАФТАЙ**;

**Р.И.МАЛАЯ; Р.П.КОЛМОГорова**;

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АГРЕГАТИВНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОУСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИЙ**

Наведено результати експериментальних досліджень впливу способів електророзрядної дії на агрегативну стійкість високостійких водонафтових емульсій. Встановлено закономірності зв'язу параметрів дії зі зміною агрегативної стійкості емульсій.

The results of experimental researches of influence of electric discharge methods on the demulsification of gravitational stability of highly stable water-oil emulsion are given. Conformities to the law of influence parameter association with the change of gravitational stability demulsification of emulsions are found.

**Постановка задачи.** Возрастающие требования к качеству материалов и значительные трудности промышленной реализации воздействия на высокоустойчивые эмульсии (сложность аппаратного оформления, недолговечность отдельных узлов и пр.) наряду с расширением областей применения таких сред, требуют поиска новых научных решений в разработке методов управления их физико-химическими свойствами.